

具有内参考热补偿功能的三层膜结构微球腔 折射率传感器*

孟令俊¹⁾ 王梦宇¹⁾ 沈远¹⁾ 杨煜¹⁾ 徐文斌²⁾ 张磊¹⁾ 王克逸^{1)†}

1) (中国科学技术大学, 精密机械与精密仪器系, 合肥 230026)

2) (光学辐射重点实验室, 北京 100039)

(2019年8月21日收到; 2019年10月11日收到修改稿)

光学微腔在高灵敏度传感中有着重要的应用前景, 而在传感中热漂移是制约其走向实用的重要因素. 本文提出了一种镀有三层膜结构的微球腔, 可以在实现高灵敏度折射率传感的同时, 具备内参考热补偿功能. 该结构由内到外分别涂覆折射率为高、低、高的薄膜, 内外两高折射率层可以分别支持各自的回音壁模式, 称之为内层模式和外层模式. 研究了波导耦合的内外模式在折射率传感和温度传感应用的表现. 结果表明, 中间膜层厚度 t_B 为 550 nm 时, 内外模式的折射率灵敏度分别为 0.0168 和 102.56 nm/RIU, 温度灵敏度分别为 -19.57 和 -28.98 pm/K. 通过监测内外模式谐振波长的差值进行传感, 对中间膜层厚度进行优化, $t_B = 400$ nm 时, 折射率灵敏度为 75.219 nm/RIU, 探测极限可以达到 2.2×10^{-4} RIU, 热漂移被减小到 3.17 pm/K, 极大地减小了热漂移对系统的影响. 本研究可为微球腔折射率传感器的设计和改进提供指导.

关键词: 光学微腔, 镀膜结构, 回音壁模式, 折射率传感

PACS: 42.50.-p, 42.55.Sa, 42.60.Da, 42.60.Fc

DOI: 10.7498/aps.69.20191265

1 引言

在过去十几年内, 回音壁模式光学微腔^[1,2] 在各类高灵敏度传感中表现出极其重要的价值, 包括折射率^[3]、温度^[4-6]、压力^[7]、角速度^[8]、振动^[9]、纳米颗粒^[10] 以及生物分子传感^[11] 等. 能够形成回音壁模式的光学微腔具备回转对称性, 根据几何形状划分具体有微球、微环、微盘、微管、微瓶及微泡等. 其中, 形状上高度对称的微球腔理论上具有最高的品质因子 Q , 被广泛应用在高灵敏度的折射率传感以及温度传感. 基于自身的高 Q 特性, 微球腔在传感应用方面具有极高的探测极限 (detection limit, DL). 例如, Hanumegowda 等^[3] 制作出的微球腔, 折射率灵敏度为 30 nm/RIU, DL 可以达到

10^{-7} RIU; Dong 等^[5] 用聚二甲基硅氧烷 (PDMS) 制作微球腔进行温度传感, 灵敏度高达 245 pm/K, 探测极限有 2×10^{-4} K. 也有科研人员通过在微腔外表面镀高折射率薄膜来提高传感灵敏度^[12].

在实际传感应用中, 入射光经过光纤并耦合进入微腔, 这一过程材料吸收能量并产生热, 微腔温度发生改变, 谐振波长会产生偏移. 这一现象在折射率传感应用方面影响更大, 因为气体或液体浓度变化时, 引起的折射率变化量通常较小, 波长偏移量一般在皮米这一量级. 因此, 热漂移的消除成为微腔传感器走向应用过程中必须解决的问题. Raghunathan 等^[13] 通过在微腔表面涂覆一层负热光系数材料, 实现很好的温度补偿效果, 但这一方案对膜层厚度的精度要求非常高. 研究人员提出在普通微腔传感结构的基础上, 加入参考微腔^[14] 和

* 国家自然科学基金 (批准号: 61775209, 41871229, 61275011) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: kywang@ustc.edu.cn

马赫-曾德尔干涉结构^[15]来减小热漂移. 也有学者提出添加温度控制器件实现温度补偿^[16], 可以将热漂移减小到 5 pm/K 以内, 但同时也会增加器件的功率损耗. Ma 等通过监测微盘腔两种不同模式谐振波长的差值实现消热^[17], 但是两种模式在透射谱中较难分辨, 限制了实际应用.

本文提出了一种三层膜结构的微球腔, 其膜层折射率从内到外依次为高、低、高. 通过分析其本征模式得到, 内外两高折射率层可以分别支持各自的模式, 就像在两个腔内的谐振模式, 称为内层模式和外层模式. 结果表明, 利用波导耦合可有效激发出这两种模式. 通过优化中间低折射率膜层的厚度, 可使内外模式的折射率灵敏度相差较大, 温度灵敏度接近. 最后监测内外模式谐振波长的差值实现高灵敏度折射率传感的同时, 极大地减小了传感时热漂移的影响.

2 结构模型与理论

2.1 结构模型

三层膜结构微球腔的结构如图 1 所示, 它由涂覆三层薄膜的微球腔以及光纤波导组成. 三层薄膜材料由外到内分别是 TiO_2 , SiO_2 , TiO_2 , 在 1550 nm 入射光下折射率依次为 2.4532, 1.444, 2.4532, 球腔本体为典型的 SiO_2 材料, 为有效激发腔内的谐振模式, 光纤波导设置为掺杂元素铋的 SiO_2 光纤, 折射率为 1.8. 三层膜结构微球腔的径向电场分布^[18]可以表示为

$$H(r) = \begin{cases} M_l \Psi_l(n_1 kr), & r < R_s, \\ C_{l1} \Psi_l(n_C kr) + D_{l1} \chi_l(n_C kr), & R_s < r < R - t_A - t_B, \\ C_{l2} \Psi_l(n_B kr) + D_{l2} \chi_l(n_B kr), & R - t_A - t_B < r < R - t_A, \\ C_{l3} \Psi_l(n_A kr) + D_{l3} \chi_l(n_A kr), & R - t_A < r < R, \\ N_l \chi_l(n_0 kr), & r > R, \end{cases} \quad (1)$$

其中三层膜的厚度由外到内依次为 t_A , t_B , t_C , 折射率依次为 n_A , n_B , n_C , 镀膜微球腔的整体尺寸为 R , R_s 为 SiO_2 微球腔的半径, $R_s = R - t_A - t_B - t_C$, n_0 为环境折射率, n_1 为球腔本体材料的折射率. 这里, $\Psi_l(z) \equiv z j_l(z)$ 和 $\chi_l(z) \equiv z n_l(z)$ 分别是球谐黎卡蒂-贝塞尔和黎卡蒂-诺伊曼函数, 其中 $j_l(z)$ 和 $n_l(z)$ 表示第一类球谐的贝塞尔和诺伊曼函数. $k = 2\pi/\lambda_R$ 为谐振波因子, λ_R 为谐振波长. 谐振条件为

$$\frac{n_B}{n_A} \cdot \frac{C_{l2}/D_{l2} \cdot \dot{\Psi}_l(z_{B2}) + \dot{\chi}_l(z_{B2})}{C_{l2}/D_{l2} \cdot \Psi_l(z_{B2}) + \chi_l(z_{B2})} = \frac{C_{l3}/D_{l3} \cdot \dot{\Psi}_l(z_{A1}) + \dot{\chi}_l(z_{A1})}{C_{l3}/D_{l3} \cdot \Psi_l(z_{A1}) + \chi_l(z_{A1})}, \quad (2)$$

其中 $z_{A1} = n_A k (R - t_A)$, $z_{B2} = n_B k (R - t_A)$. 系数 M_l , N_l , C_{l1} , D_{l1} , C_{l2} , D_{l2} , C_{l3} , D_{l3} 由边界条件 $r = R$, $r = R - t_A$, $r = R - t_A - t_B$, $r = R - t_A - t_B - t_C$ 确定. 具体地, SiO_2 球腔本体尺寸 $R_s = 9.05 \mu\text{m}$, 两高折射率膜层厚度 $t_A = t_C = 200 \text{ nm}$, 图 2 是不同中间膜层厚度 t_B 对应谐振模式的电场

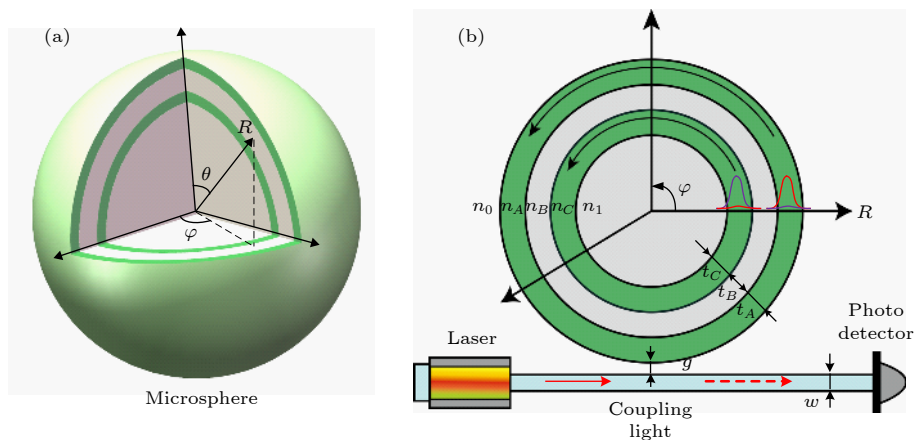


图 1 耦合三层膜结构微球腔模型示意图 (a) 三层膜结构微球腔模型; (b) 二维仿真模型

Fig. 1. Schematic drawing of a coupled triple-layer-coated microsphere model: (a) Triple-layer-coated microsphere model; (b) 2D simulation model.

分布, 以及模式的径向电场分布曲线. 由电场分布可以看出, 内外两个高折射率膜层支持各自的 WGM, 称之为内层模式 (inner mode, IM)、外层模式 (outer mode, OM).

由图 2 可以看到当 t_B 较小时, 外 (内) 层模式在内 (外) 层也有谐振现象, 这是因为两膜层距离太近, 倏逝波很容易渗透到另外一个膜层, 产生模式耦合. 随着 t_B 的增加, 模式耦合逐渐变得微弱, 直至几乎消失. t_B 较大的话, 内层距离外界环境太远, 使 IM 变得微弱, 在透射谱中很难确定模式对应的谐振峰. 因此, 中间膜层厚度 t_B 取值应当适当, 本文取 $t_B = 550$ nm 进行波导耦合三层膜结构微球腔的仿真. 对于折射率传感而言, 灵敏度的高低取决于渗透到外界的倏逝场能量占模式总能量比例的大小. 因此, 可以确定的是, 当其他结构参数确定后, 中间膜层的厚度 t_B 对内外模式的折射率灵敏度影响很大.

2.2 折射率与温度传感理论

本节介绍具有内参考热补偿功能的三层膜结构微球腔在折射率与温度传感应用的原理, 如图 1(b) 所示, 光纤波导位于腔体附近用来将光耦合进入腔

内, 波导的尺寸以及波导与腔体之间的间隙需要经过严格匹配来满足两者的相位匹配关系, 保证能高效激发出腔内的谐振模式. 当微腔周围环境物理参数改变, 比如折射率、温度、磁场强度、压强等, 会引起微腔谐振波长发生偏移, 这一机制称为模式移动 [19]. 根据微扰理论, OM 与 IM 的折射率灵敏度可以分别表示为 [20]:

$$S_{o,n} = \frac{\lambda_{R,o}}{n_0} \eta_{0,o}, \quad S_{i,n} = \frac{\lambda_{R,i}}{n_0} \eta_{0,i} \quad (3)$$

其中 OM 与 IM 分别用下标“o”和“i”表示, η_0 表示模式渗透到外部环境的电场能量占总能量的比例.

温度发生变化, 基于热光效应和热膨胀, 微腔的折射率以及结构尺寸都会发生改变, 导致谐振波长偏移. 对于热光效应而言, 可以得到折射率变化引起 WGM 谐振波长偏移的表达式:

$$(\delta\lambda_R)_{\text{thermal-optic}} = \lambda_R \sum_j \frac{\eta_j (dn_j/dT)}{n_j} \cdot \delta T, \quad (4)$$

其中 η_j ($j = 0, A, B, C, 1$) 分别表示外部环境、膜层 A、膜层 B、膜层 C 以及 SiO₂ 微腔本体的电场能量占模式总能量的比例, dn_j/dT 表示各区域所对应材料的热光系数.

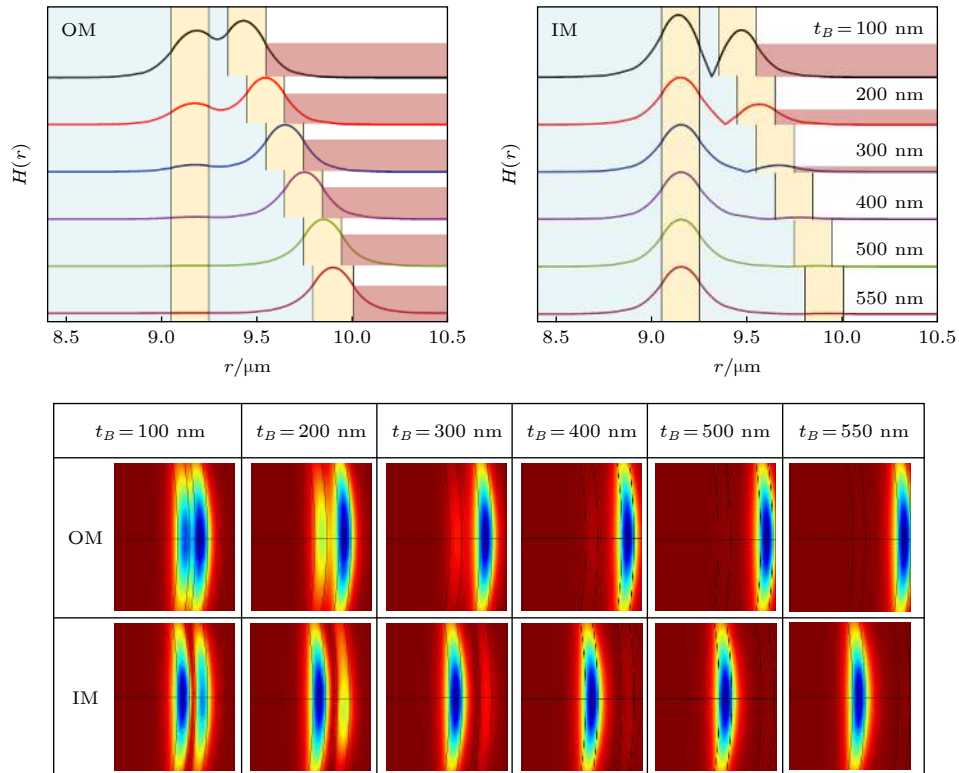


图 2 不同中间膜层厚度时内外模式的电场径向分布曲线及电场分布云图

Fig. 2. Electric field distributions of the inner and outer modes and the distributions along the radial direction with a various t_B .

内外模式在热膨胀效应下的谐振波长偏移公式为:

$$(\delta\lambda_{R,i})_{\text{expansion}} = (\chi_{1,i}\alpha_1 R_s + \chi_{2,i}\alpha_C t_C) \delta T, \quad (5)$$

$$(\delta\lambda_{R,o})_{\text{expansion}} = [\chi_{1,o}(\alpha_1 R_s + \alpha_B t_B + \alpha_C t_C) + \chi_{2,o}\alpha_A t_A] \delta T, \quad (6)$$

其中 α_j ($j = 1, A, B, C$) 分别表示球腔本体以及由外到内三层膜的热膨胀系数, χ_1 和 χ_2 表示热膨胀导致的波长偏移系数, 可由有限元软件计算得到.

温度传感灵敏度 $S_T = \delta\lambda_R/\delta T$, 综上, 内外模式的温度传感灵敏度表示为:

$$S_{i,T} = \lambda_{R,i} \sum_j \frac{\eta_{j,i} (dn_j/dT)}{n_j} + \chi_{1,i}\alpha_1 R_s + \chi_{2,i}\alpha_C t_C, \quad (7)$$

$$S_{o,T} = \lambda_{R,o} \sum_j \frac{\eta_{j,o} (dn_j/dT)}{n_j} + \chi_{1,o}(\alpha_1 R_s + \alpha_B t_B + \alpha_C t_C) + \chi_{2,o}\alpha_A t_A. \quad (8)$$

3 传感特性分析

3.1 光波导耦合

在有限元仿真软件 COMSOL 中建立波导耦合的三层膜结构微球腔的二维仿真模型. 直接采用三维模型进行求解对计算机的硬件条件要求非常高, 而微球腔具有高度对称性, 可以在柱坐标系下分离变量, 降低待求解问题的维度, 即采用二维计算, 而且基膜条件下, 模场分布表现为赤道附近的亮环, 二维模型的计算结果与实验结果能很好地符合, 被广泛应用于微球腔的仿真模拟^[21,22]. 其中, 入射波长 $\lambda = 1550$ nm, 球腔本体尺寸设置为 $R_s = 9.05$ μm , 两高折射率膜层的厚度 $t_A = t_C = 200$ nm, 中间膜层厚度 $t_B = 550$ nm. 波导宽度 $w = 500$ nm, 波导与微腔的耦合距离 $g = 290$ nm.

仿真结果如图 3 所示, 在 1500—1580 nm 的波长范围内, 有多个谐振模式被激发出来. 对于具有消除热漂移的三层膜结构微球腔而言, 需要同时监测透射谱中内外模式的谐振波长偏移量, 本文将谐振波长为 1501.28 nm 的 OM 与谐振波长为 1512.99 nm 的 IM 作为研究对象, 进行折射率与温度传感的仿真模拟. 品质因子 Q 可以表示为 $Q = \lambda_R/\text{FWHM}$, 其中 FWHM(full width at half

maximum) 代表谐振模式的半高全宽. 可以求得 OM 的 $Q \approx 8.34 \times 10^3$, IM 的 $Q \approx 1.89 \times 10^4$.

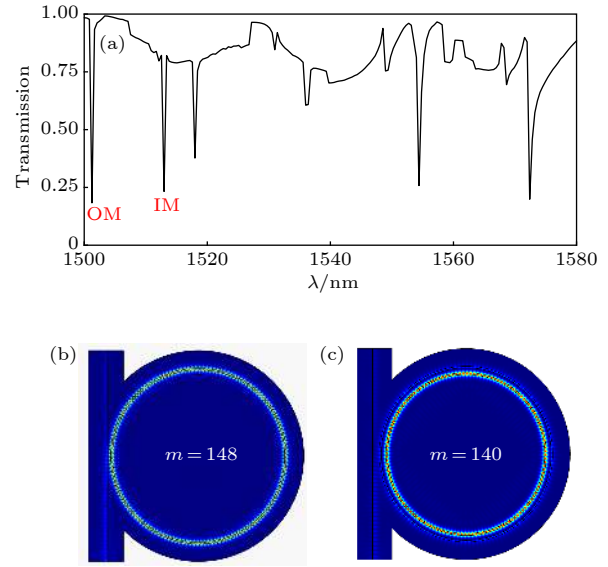


图 3 (a) $t_B = 550$ nm 时球腔的透射谱; (b) 外层模式 ($m = 148$); (c) 内层模式 ($m = 140$)

Fig. 3. (a) The transmission spectrum of the microsphere when $t_B = 550$ nm; (b) the outer mode ($m = 148$); (c) the inner mode ($m = 140$).

3.2 折射率传感特性

为了研究三层膜结构微球腔在折射率传感方面的应用, 本文将微腔外部环境设置为葡萄糖溶液, 其折射率与浓度的关系可以表示为^[23]

$$n_{\text{glucose}} = n_{\text{H}_2\text{O}} + 1.515c_{\text{glucose}}, \quad (9)$$

其中 n_{glucose} 和 $n_{\text{H}_2\text{O}}$ 分别是葡萄糖溶液以及纯水的折射率, 取 $n_{\text{H}_2\text{O}} = 1.33$ ^[17], c_{glucose} 为葡萄糖溶液的浓度, 单位为 g/ml.

内外模式的谐振波长与外界环境折射率变化的关系如图 4 所示. 谐振波长随外界环境折射率的增大而增大, 即发生了红移. 这是因为环境的折射率增加, 使得耦合体系的有效折射率 n_{eff} 增大, 由谐振相位匹配条件有 $2\pi R n_{\text{eff}} = \lambda_R m$, m 为角向模式数, 因此 n_{eff} 增大, 谐振波长 λ_R 也随之增大. 外界环境折射率变化范围为 1.33—1.335, 在该范围内, 经过线性拟合, OM 的折射率灵敏度 $S_{o,n} = 102.56$ nm/RIU, IM 的折射率灵敏度 $S_{i,n} = 0.0168$ nm/RIU, 灵敏度相差六千多倍.

3.3 温度传感特性

热光系数 TOC (thermo-optic coefficient) 描

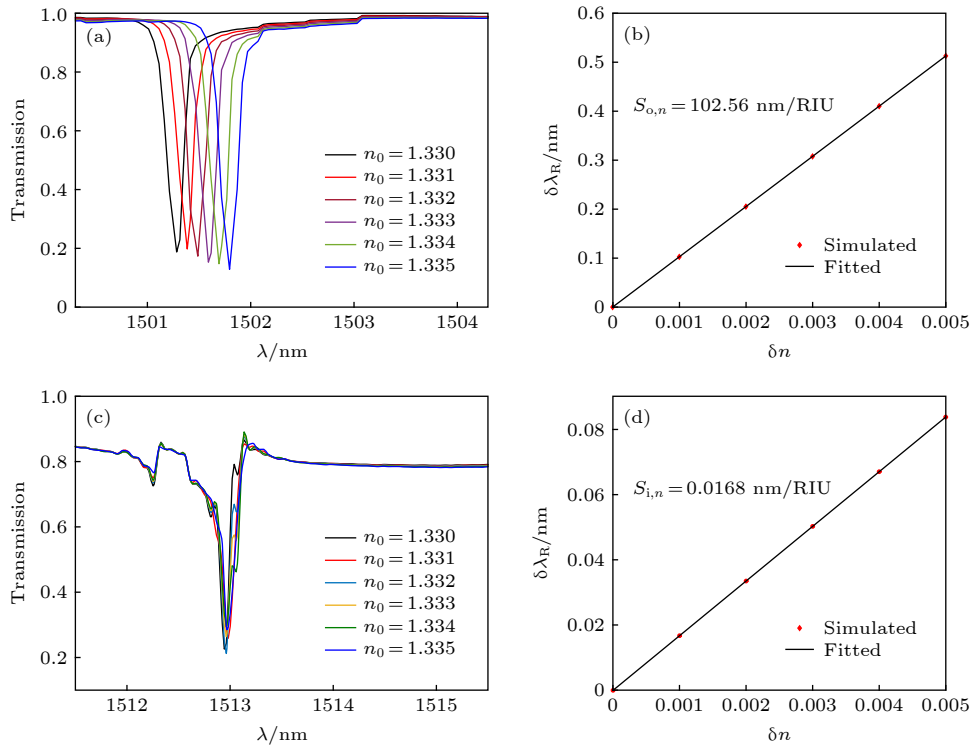


图 4 外层模式 (a) 与内层模式 (c) 透射谱随外界环境折射率的变化趋势; 外层模式 (b) 与内层模式 (d) 谐振波长偏移量 $\delta\lambda_R$ 与外界环境折射率变化量 δn 的关系

Fig. 4. Transmission spectra for the outer mode (a) and the inner mode (c) with the change of the external environment RI; The relationship between the shift of the resonance wavelength $\delta\lambda_R$ and the change of the external environment RI δn for the outer mode (b) and the inner mode (d).

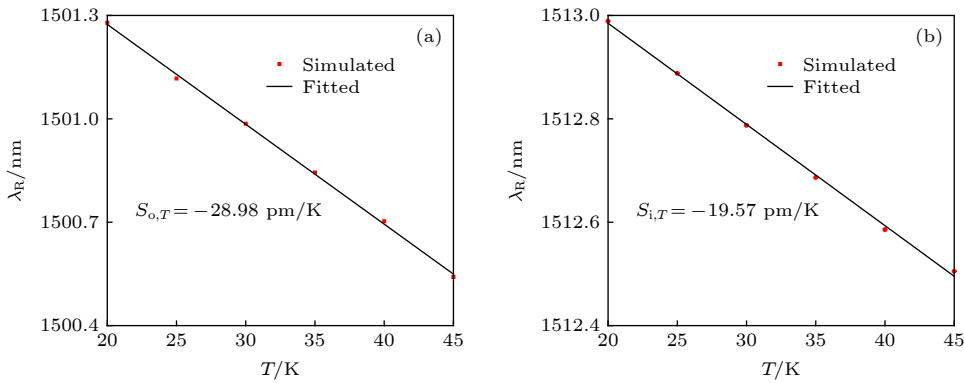


图 5 外层模式 (a) 与内层模式 (b) 谐振波长 λ_R 与环境温度 T 的关系

Fig. 5. The relationship between the resonance wavelength λ_R and the environment temperature T for the outer mode (a) and the inner mode (b).

述了材料折射率变化与温度变化的关系. SiO_2 , TiO_2 , 水的热光系数分别为 1.19×10^{-5} [24], -4.9×10^{-5} [25] 和 $-9.1 \times 10^{-5}/\text{K}$ [26], SiO_2 , TiO_2 的热膨胀系数分别为 5.5×10^{-7} [24], $7.14 \times 10^{-6}/\text{K}$ [20]. 谐振波长 λ_R 与环境温度 T 的关系如图 5 所示, 温度升高, 内外模式的谐振波长都会向短波长方向移动, 经过线性拟合后, 温度灵敏度分别为 $S_{i,T} = -19.57 \text{ pm/K}$, $S_{o,T} = -28.98 \text{ pm/K}$. 可以看到,

内外模式的温度灵敏度有较大差异, 这主要是微腔周围环境的负热光系数引起的. 高折射率膜层的 TiO_2 具有负 TOC, 温度升高时, 谐振波长减小, 产生蓝移效果, 而绝大多数水溶液都是负 TOC, 温度升高, 折射率减小, 同样会使谐振产生蓝移. 内外模式的温度灵敏度差异主要来自于折射率灵敏度的巨大差距, 外层模式的折射率灵敏度远大于内层模式, 因此由外界环境负 TOC 引起的蓝移效果更

加显著, 温度灵敏度也就明显大于内层模式. 三层膜结构微球腔通过监测内外模式谐振波长的差值进行折射率传感, 中间层厚度 $t_B = 550$ nm 时, 内外模式的温度灵敏度差值为 9.41 pm/K, 热漂移仍然较大. 为减小热漂移, 需要对结构尺寸进行优化, 使内外层模式的温度灵敏度差值减小.

3.4 中间膜层厚度对传感特性的影响

三层膜结构微球腔相对于镀一层膜的微腔而言, 优势在于多了一个可调节的维度, 即中间膜层厚度 t_B . 不同中间层厚度时, 内外层模式折射率灵敏度如图 6(a) 所示. t_B 减小时, OM 有更多的能量穿过中间层, 在内层发生微弱的谐振, 渗透到外界环境的能量也随之减少, 折射率灵敏度下降; 同样地, IM 有更多的能量渗透到外界环境, 折射率灵敏度也随之增加. 这一结论与本征模式仿真的结果相符合.

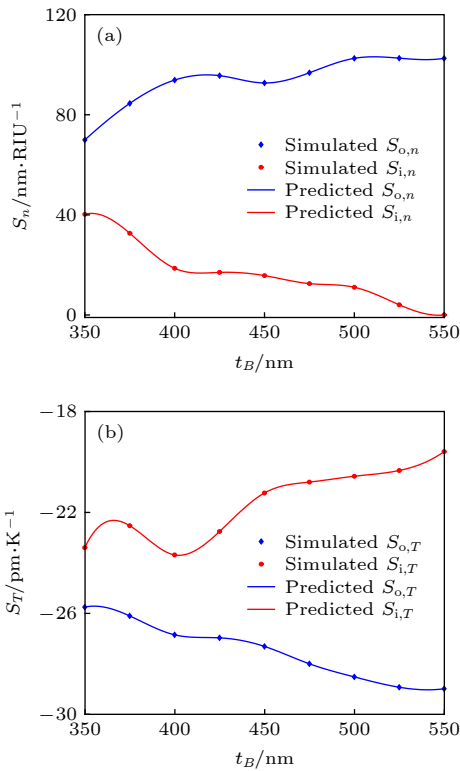


图 6 不同中间层厚度 t_B 时内外模式的折射率灵敏度 (a) 和温度灵敏度 (b)

Fig. 6. The refractive index sensitivity (a) and temperature sensitivity (b) for the inner mode and the outer mode with a various t_B .

而 t_B 改变, 影响的不只是折射率传感, 探测环境为葡萄糖溶液, 内外模式折射率灵敏度的

差异会引起温度灵敏度的差异. 不同 t_B 情况下内外模式的温度灵敏度变化趋势如图 6(b) 所示, 可以看到 t_B 减小时, 热漂移逐渐被衰减. $t_B = 400$ nm 时, 内外模式的折射率灵敏度分别为 $S_{i,n} = 18.659$ nm/RIU, $S_{o,n} = 93.878$ nm/RIU, 灵敏度差值 $\Delta S_n = 75.219$ nm/RIU; 温度灵敏度分别为 $S_{i,T} = -23.67$ pm/K, $S_{o,T} = -26.84$ pm/K, 差值 $\Delta S_T = 3.17$ pm/K, 这一数值比外层模式的温度灵敏度小了 7 倍多, 热漂移在很大程度上被衰减. $t_B = 400$ nm 时, OM 的品质因子 $Q \approx 1.06 \times 10^4$, IM 的品质因子 $Q \approx 6.66 \times 10^3$.

探测极限 DL 表征能够监测到的待测物理量的最小值, 可以表示为^[27]

$$DL = \frac{3FWHM}{4.5(SNR)^{0.25}S}, \quad (10)$$

其中 S 为灵敏度, SNR 为信噪比, 在 (10) 式中是线性单位 (例如, 60 dB = 10^6), 本文 SNR = 60 dB. 内外模式的折射率探测极限分别为 2.2×10^{-4} 和 3.4×10^{-5} RIU.

三层膜结构微球腔相对于其他消热方案有许多优势, 其结构紧凑、体积小、不用添加辅助器件、消热效果显著. 相对于涂覆负热光系数薄膜这一方案, 三层膜结构微球腔对中间层厚度精度要求较低, 因为 t_B 在一定范围内都具有较好的热补偿效果. 内外模式折射率灵敏度有较大差距, 在透射谱中 OM 与 IM 可以通过调整外界环境折射率的方法进行分辨.

4 结 论

本文提出了一种涂覆三层薄膜的微球腔, 三层薄膜折射率由内到外分别为高、低、高, 在两高折射率膜层内分别支持各自的 WGM. 首先对三层膜结构微球腔的径向电场分布进行了理论推导, 借助有限元的方法求出不同中间层厚度 t_B 时, 内外模式的电场分布与径向电场曲线. 中间膜层厚度越小, 内层模式的能量就越容易穿过中间层、外层, 渗透到外界环境, 外层模式的能量也更容易渗透到内层. 并给出了三层膜结构微球腔用于折射率传感与温度传感的理论公式. 研究了波导耦合的 IM 和 OM 在折射率传感和温度传感的应用. 仿真结果表明, $t_B = 550$ nm 时, 内外模式的折射率灵敏度分别为 $S_{i,n} = 0.0168$ nm/RIU, $S_{o,n} = 102.56$ nm/RIU,

灵敏度相差六千多倍; 温度灵敏度分别为 $S_{i,T} = -19.57$ pm/K, $S_{o,T} = -28.98$ pm/K, 内外模式的温度灵敏度有较大差异, 这主要是微腔周围环境的负热光系数引起的. 三层膜结构微球腔通过监测内外模式谐振波长的差值进行折射率传感, 对中间膜层厚度 t_B 进行优化, $t_B = 400$ nm 时, 折射率灵敏度为 75.219 nm/RIU, 探测极限 DL 可达到 2.2×10^{-4} RIU, 热漂移被减小到 3.17 pm/K. 本文提出的三层膜结构微球腔可以实现高灵敏度折射率传感, 同时热漂移的影响被大幅减小. 本研究可为微球腔折射率传感器的设计和改进提供指导.

参考文献

- [1] Vahala K J 2003 *Nature* **424** 839
- [2] Song Q H 2019 *Sci. China Phys. Mech. Astron.* **62** 074231
- [3] Hanumegowda N M, Stica C J, Patel B C, White I, Fan X D 2005 *Appl. Phys. Lett.* **87** 201107
- [4] Yang K, Dai S X, Wu Y H, Nie Q H 2018 *Chin. Phys. B* **27** 117701
- [5] Dong C H, He L, Xiao Y F, Gaddam V, Ozdemir S, Han Z F, Guo G C, Yang L 2009 *Appl. Phys. Lett.* **94** 231119
- [6] Liu S, Sun W Z, Wang Y J, Yu X Y, Xu K, Huang Y Z, Xiao S M, Song Q H 2018 *Optica* **5** 612
- [7] Ioppolo T, Kozhevnikov M, Stepaniuk V, Otugen M V, Sheverev V 2008 *Appl. Opt.* **47** 3009
- [8] Qian K, Tang J, Guo H, Zhang W, Liu J H, Liu J, Xue C Y, Zhang W D 2016 *Chin. Phys. B* **25** 114209
- [9] Rubino E, Ioppolo T 2018 *Vibration* **1** 239
- [10] Chen H J, Fang X W, Chen C Z, Li Y 2016 *Acta Phys. Sin.* **65** 194205 (in Chinese) [陈华俊, 方贤文, 陈昌兆, 李洋 2016 物理学报 **65** 194205]
- [11] Frustaci S, Vollmer F 2019 *Curr. Opin. Chem. Biol.* **51** 66
- [12] Teraoka I, Arnold S 2007 *J. Opt. Soc. Am. B* **24** 653
- [13] Raghunathan V, Ye W N, Hu J, Izuhara T, Michel J, Kimerling L 2010 *Opt. Express* **18** 17631
- [14] Yi H J, Citrin D S, Zhou Z P 2011 *IEEE J. Quantum Elect.* **47** 354
- [15] Zhang X J, Feng X, Zhang D K, Huang Y D 2012 *Chin. Phys. B* **21** 250
- [16] Deng Q Z, Li X B, Zhou Z P, Yi H X 2014 *Photonics Res.* **2** 71
- [17] Ma T, Yuan J H, Sun L, Kang Z, Yan B B, Sang X Z, Wang K R, Wu Q, Liu H, Gao J H, Yu C X 2017 *IEEE Photonics J.* **9** 6800913
- [18] Wang M Y, Jin X Y, Li F, Cai B L, Wang K Y 2018 *Opt. Commun.* **427** 70
- [19] Tang S J, Li B B, Xiao Y F 2019 *Physics* **48** 137 (in Chinese) [唐水晶, 李贝贝, 肖云峰 2019 物理 **48** 137]
- [20] Dong Y C, Wang K Y, Jin X Y 2015 *Opt. Commun.* **344** 92
- [21] Wang P F, Ding M, Murugan G S, Bo L, Guan C Y, Semenova Y, Wu Q, Farrell G, Brambilla G 2014 *Opt. Lett.* **39** 5208
- [22] Wang P F, Ding M, Lee T, Murugan G S, Bo L, Semenova Y, Wu Q, Hewak D, Brambilla G, Farrell G 2013 *Appl. Phys. Lett.* **102** 131110
- [23] Tuchin V V, Maksimova I L, Zimnyakov D A, Kon I L, Mavlyutov A H, Mishin A A 1997 *J. Biomed. Opt.* **2** 401
- [24] He L, Xiao Y F, Dong C, Zhu J, Gaddam V, Yang L 2008 *Appl. Phys. Lett.* **93** 201102
- [25] Reshef O, Shtyrkova K, Moebius M, Nascimento S, Spector S, Evans C, Ippen E, Mazur E 2015 *J. Opt. Soc. Am. B* **32** 2288
- [26] Daimon M, Masumura A 2007 *Appl. Opt.* **46** 3811
- [27] White M I, Fan X D 2008 *Opt. Express* **16** 1020

Triple-layer-coated microspheres for refractive index sensor with internally referenced self-compensated thermal effect*

Meng Ling-Jun¹⁾ Wang Meng-Yu¹⁾ Shen Yuan¹⁾ Yang Yu¹⁾
Xu Wen-Bin²⁾ Zhang Lei¹⁾ Wang Ke-Yi^{1)†}

1) (*Department of Precision Machinery and Precision Instrumentation, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China*)

2) (*Science and Technology on Optical Radiation Laboratory, Beijing 100039, China*)

(Received 21 August 2019; revised manuscript received 11 October 2019)

Abstract

Optical microcavity has an important and promising application in high sensitivity sensing, but thermal drift hinders its practical use. In this study, we propose a triple-layer-coated microsphere resonator, which has a high sensitivity in refractive index sensing with low thermal drift. The refractive indexes of the three layers from the inside to the outside are high, low, and high, respectively. The two high refractive index layers can support their own whispering-gallery modes, called the inner mode (IM) and the outer mode (OM). We study the performance of IM and OM with waveguide coupling in refractive index sensing and temperature sensing. The results show that when the thickness of the middle layer is 550 nm, the refractive index sensitivity of IM and OM will be 0.0168 nm/RIU, 102.56 nm/RIU, and the temperature sensitivity will be -19.57 pm/K and -28.98 pm/K, respectively. The sensing is carried out by monitoring the difference in resonant wavelength between IM and OM and the sensing characteristics are optimized by adjusting the thickness of the middle layer. Further, when $t_B = 400$ nm, the refractive index sensitivity can arrive at 75.219 nm/RIU, the detection limit can reach 2.2×10^{-4} RIU, and the thermal drift is reduced to 3.17 pm/K, thereby eliminating the effect of thermal drift to a great degree. This study provides the guidance for designing and improving the microsphere refractive index sensors.

Keywords: optical microcavity, coated layer structure, whispering-gallery modes, refractive index sensing

PACS: 42.50.-p, 42.55.Sa, 42.60.Da, 42.60.Fc

DOI: [10.7498/aps.69.20191265](https://doi.org/10.7498/aps.69.20191265)

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos.61775209, 41871229, 61275011).

† Corresponding author. E-mail: kywang@ustc.edu.cn